

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 07-093028

(43)Date of publication of application : 07.04.1995

(51)Int.CI.

G05D 1/02  
F41H 11/12

(21)Application number : 05-257581

(71)Applicant : AGENCY OF IND SCIENCE &amp; TECHNOL

(22)Date of filing : 21.09.1993

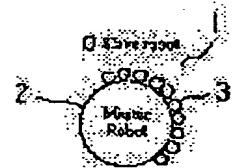
(72)Inventor : SHIBATA TAKANORI  
TANIE KAZUO

## (54) CONTROL METHOD FOR AUTONOMY TYPE MOVING ROBOT GROUP SYSTEM

## (57)Abstract:

PURPOSE: To make the optimization of the system relatively easy, to reduce the load of computation at route planning time on a master robot, to reduce a waste of time due to cooperative operation and improve the efficiency of the system, and to prevent the master robot from becoming faulty and reach a goal.

CONSTITUTION: This method is a control method for a moving robot group system consisting of one master robot 2 and plural slave robots 3i, and, the master robot 2 determines the arrangement and movement routes of the slave robots 3i and supplies the positions and movement routes to the slave robots 3i, and also plans its route from a starting point to a destination of the master robot 2 by route programming by using information by the sensing of the master robot 2 and slave robots 3i to move. The moving robot group has a self-repairing function.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 21.09.1993

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 2692725

[Date of registration] 05.09.1997

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19)日本国特許庁 (JP)

## (12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平7-93028

(43)公開日 平成7年(1995)4月7日

(51)Int.Cl.  
G 05 D 1/02識別記号  
H 9323-3H  
J 9323-3H  
P 9323-3H

F I

技術表示箇所

F 41 H 11/12

審査請求 有 請求項の数1 FD (全9頁)

(21)出願番号 特願平5-257581

(22)出願日 平成5年(1993)9月21日

(71)出願人 000001144

工業技術院長

東京都千代田区霞が関1丁目3番1号

(72)発明者 柴田 崇徳

茨城県つくば市並木1丁目2番地 工業技術院機械技術研究所内

(72)発明者 谷江 和雄

茨城県つくば市並木1丁目2番地 工業技術院機械技術研究所内

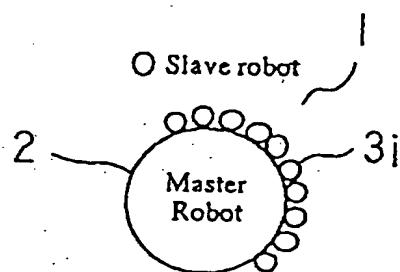
(74)指定代理人 工業技術院機械技術研究所長

## (54)【発明の名称】自律型移動ロボット群システムの制御方法

## (57)【要約】

【目的】 システムの最適化が比較的容易であり、親ロボットの経路計画時の計算の負荷を低減させることができ、協調動作による無駄時間の発生を少なくしてシステムの効率を上げることができ、親ロボットの故障を防いで目標を達成することができる自律型移動ロボット群システムの制御方法を提供すること。

【構成】 1個の親ロボット2と複数の子ロボット3からなる移動ロボット群システムの制御方法であって、親ロボット2は子ロボット3の配置と移動経路を決定して子ロボット3に位置と移動経路の指令を与えるとともに親ロボット2と子ロボット3のセンシングによる情報を使用して経路計画法によって親ロボット2が出発地から目的地まで移動する経路を計画して実行する。移動ロボット群は自己修復機能をもつ。





(3)

3

機能を持たせ、子ロボットには接触型センサによるセンシング機能を持たせ、親ロボットは子ロボットの配置と移動経路を決定して子ロボットに位置と移動経路の指令を与えるとともに親ロボットのセンシングによる情報と子ロボットのセンシングによる情報を使用して経路計画法によって親ロボットが出発地から目的地まで移動する経路を計画して実行することを特徴としている。

#### 【0006】

【作用】ロボット群は1台の親ロボットと複数台の子ロボットから成る。親ロボットは自己の動作を決定しつつ子ロボットの動作を管理する。子ロボットは親ロボットの指示によって短距離を直線的に移動し、障害物がなければ目標点でUターンして親ロボットの所へ戻り、障害物や異常が無いことを報告する。障害物が存在した場合には、接点からUターンした後、親ロボットからの距離を報告する。さらに、穴や爆発物などが存在し、子ロボットが引き返すことができなくなった場合には、親ロボットは子ロボットからの報告が無いことから異常を認識し、その方向への移動をしないように経路を計画する。このように、複数の子ロボットが環境の接触センシングを行い、親ロボットにその報告をする。親ロボットは協調センシングとしての複数の子ロボットからの環境情報を基に経路計画を行い、実行する。移動ロボット群は故障した子ロボットに関する自己修復機能をもつ。

#### 【0007】

【実施例】以下、この発明の詳細を一実施例を示す図面について説明する。この発明において使用するロボット群1は図1に示すように、親ロボット2と複数の子ロボット3i (i=1~n)とで構成されている。親ロボット2が必要とする機能は、ミッションを完遂するように行動を計画し実行することである。単に自己の動作を決定するのではなく、他の子ロボット3iの動作を管理しながらシステムとしての行動の最適化を図る必要がある。ただし、本システムの特徴として、親ロボット2が最終的に存在していれば、タスクを達成することが可能であるとする。親ロボット2は子ロボット3iの行動を計画し、進行方向に対して扇形に子ロボット3iが広がってセンシングを行うように指示する。その広がり方とセンシングの距離を子ロボット3iの数に応じて計画する。また親ロボット2の機能としてエネルギーの供給を子ロボット3iに行うとする。親ロボット2は図2に示すように、主として経路計画をするための計算装置4、子ロボットとの通信を行うための通信装置5、キャタピラや車輪及びそれらを制御駆動する移動装置6、非接触センサ7、移動距離測定装置8、子ロボットにエネルギーを供給するためのエネルギー供給装置11、子ロボットを載置するスカート12等を有する。

【0008】一方、子ロボット3iは、親ロボット2によってその行動を決定されるため、自律性は弱くまた親ロボット2の計画の負担を軽減するために機能も低レベ

4

ルである。ここでは、危険な未知環境下で移動を行うことをロボット群1の行動の目的とし、子ロボット3iが接触型のセンシングを担当する。つまり、危険な障害物に接触して子ロボット3iが壊れてしまっても、群としては活動を継続できる耐故障性を持つシステムである。子ロボット3iは親ロボットからの指令によって行動を自立するための計算装置13、親ロボットとの通信を行うための通信装置14、キャタピラや車輪及びそれらを制御駆動する移動装置15、接触センサ16、移動距離測定装置17、親ロボットからエネルギーの供給を受けるためのエネルギー受入装置18等を有する。

【0009】親ロボット2は自己のセンシングによる環境情報と協調センシング素子として働く複数の子ロボット3iからの環境情報を基に経路計画を行う。経路計画時には目標地点だけがミッションとして与えられているものとする。

【0010】このように、環境情報を子ロボット3iの協調センシング行動に基づき獲得することによって、安全に障害物を回避して移動を行うことができる。移動時には親ロボット2の上に子ロボット3iが乗って移動する場合や親ロボット2の後を子ロボット3iがついて行く場合、あるいは親ロボット2が決定した経路の進行方向とその距離を子ロボット3iに与える場合を考えられるが、順にアルゴリズムが複雑になる。ここでは、子ロボット3iの機能をシンプルにするために前者の方法を用いることとする。

【0011】(親子型ロボットの動作アルゴリズム) 上記した機能を有するロボットシステムのための子ロボット3i、親ロボット2の動作アルゴリズムについて述べる。

【0012】(子ロボットの特性) 子ロボット3iは親ロボット2の指示に基づいて移動する。図3のように移動機能としてセンシング時には与えられた方向に向かって直線的に前進し、目標の距離になると後退する。また、障害物21に接触したときには、図4のようにそれ以上進もうとせず自分が移動した距離によって親ロボット2とその障害物21の距離を認識し、Uターンして親ロボット2の元に戻り、通信によって報告する。群となって全体が移動するときには、親ロボット2の上に子ロボット3iが乗って移動する。またエネルギーの供給を親ロボット2から受けることができるとする。

【0013】(親ロボットの特性) 親ロボット2は大きく2つの機能を有する。一つは子ロボット3iの管理であり、もう一つは子ロボット3iによるセンシングの結果から、群れ全体で移動するための経路を決定し、移動することである。協調センシングのために、子ロボット3iの数に応じてそのセンシングの広がりと範囲を決定し、子ロボット3iに対してセンシングを指示する。そのとき子ロボット3iとの関係は有線で結ばれている場合と無線で通信が必要な場合があるが、ここでは無

(4)

5

線による通信機能を持つとする。

【0014】(親ロボット2による子ロボット3iの管理)各子ロボット3iに対して、移動の方向とその距離を指示する。図3のように、センシングの範囲の広がりをその時の進行方向に対して±θとする。したがって、子ロボット3iがn台の場合、子ロボット3i間のセンシングの間隔は、

【0015】

【数1】

$$\theta = \frac{2\Theta}{n-1}$$

【0016】である。そして始めに子ロボット3iが直進してセンシングする距離を  $r = r_0$  とする。図5のように、子ロボットが危険な障害物に接触することによって破壊されてしまった場合には、故障していなくなってしまった子ロボットを図6のようにセンシングするそれぞれの子ロボット3iの広がりを変えるという自己修復機能で捕らう。しかし、扇上に広がった先端の部分ではロボット間の間隔が広がりすぎて、センシングにミスを生ずる可能性があるため、台数が減るごとにその進行距離を縮めて安全性を高める。したがって、p台のロボットが破壊された場合には、センシングの広がりを、

【0017】

【数2】

$$\theta = \frac{2\Theta}{n-1-p}$$

【0018】と変更し、さらに直進してセンシングする距離rを

【0019】

【数3】

$$r = (r_0 - r_b) \cdot \frac{n-p}{n} + r_b$$

【0020】に変更する。ただし、 $r_0$  はセンシング範囲の初期値、 $r_b$  はバイアス値である。

【0021】(親ロボットによるナビゲーション) 移動ロボットの経路計画はこれまでに多く研究されている。環境が既知の場合には、空間を構造化したグラフを用いて最適経路を決定する方法等が提案されている (N. J. Nilsson, A Mobile Automation, an Application of Artificial Intelligence Techniques, Proc. of IJCAI, pp. 509 (1969)), (T. Lozano-Perez and M. A. Wesley, An Algorithm for Planning Collision Free Paths among Obstacles, Communication ACM, 22, pp. 560 (1979)), (登尾、浪花、有本、クワッドツリーを利用した移動ロボットの高速経路生成アルゴリズム、日本ロボット学会誌、7巻、5号、pp. 403-412(1989)), (M. K. Habib and H. Asama, Efficient Method to Generate Collision Free Paths for Autonomous Mobile Robot Based on New Free Space Structuring Approach

(4)

6

h, Proc. of IEEE/RSJ IROS '91, Vol. 2, pp. 563-567(1991) 及び (柴田、福田、他、Genetic Algorithm を用いた移動ロボットの最適経路計画、機論、C編、58巻、553号pp. 2714-2720(1992) ) )。しかし、この発明の制御方法では未知環境での移動を扱うため、センサ情報に基づく行動決定法が必要である。障害物回避の方法として、ルールに基づく方法 (石川、ファジィ制御を用いた自律型移動ロボットの誘導方式の検討、日本ロボット学会誌、Vol. 9, No. 2, pp. 149-161(1991)) や、

10 障害物に沿って移動しながら目標地に向かう方法 (V. J. Lumelsky, A. A. Stepanov, Dynamic Path Planning for a Mobile Automation with Limited Information on the Environment, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-31, No. 11, pp. 1058-1063(1986)) ,

(登尾、早野、ゴールまでのユークリッド距離の漸近的減少性にもとづいたパスプランニングアルゴリズム、日本機械学会FANシンポジウム講演論文集、pp. 195-199(1991) ) が提案されているが、この発明ではポテンシャル法を用いる (奥富、森、ポテンシャル場を用いたロボットの動作決定、日本ロボット学会誌、Vol. 1, No. 3, pp. 226-232(1983)), (O. Khatib, Real Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, pp. 500-505(1985)), (R. A. Brooks, A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE J. Robotics and Automation, RA-2, pp. 14-23 (1986)), (T. L. Anderson, M. Donath, Animal Behaviors as a Paradigm for Developing Robot Autonomy, Designing Autonomous Agents, pp. 145-168 (1990))

20 及び (R. C. Arkin, Behavior-Based Robot Navigation for Extended Domains, Adaptive Behavior, Vol. 1, No. 2, pp. 201-225 (1992) ) )。人間があらかじめ与える目標地点に向かってポテンシャル場を構成し、子ロボット3iのセンシング機能によって獲得された障害物や危険方向の情報をガウス基底関数を用いて表現し、確率的にその存在をポテンシャル場に表現する。これを親ロボット2が生成する環境地図とし、経路計画に用いる。なお、危険回避のため子ロボット3iがセンシングした範囲に対してロボット群1として移動する距離は安全率をかけて短くしておく。以上の動作のフローチャートを図7に示す。具体的なアルゴリズムを以下に述べる。まず親ロボット2が目標地を知っているとすれば、親ロボットと目標地との位置関係から次のポテンシャル関数Uを定義することができる。

30 【0022】

【数4】

$$U(x) = \frac{1}{2} \cdot k_g \cdot (g - x)^2$$

【0023】ただし、  
kg : 目標値に依存する勾配の大きさを決定する係数、

(5)

7  
g : 目標地点の位置ベクトル  
x : ロボット群の位置  
このとき、目標値にロボットが向かう様に働く力を勾配を用いて次式で与える。 \$

【数5】

$$\begin{aligned} f_g &= -\text{grad}(U(x)) \\ &= k_g \cdot (g - x) \end{aligned}$$

【0024】ただし、

10  
f<sub>g</sub> : ロボットの現在位置から目標地点までの勾配の大きさと方向。

協調センシングによってそれぞれの子ロボット<sub>3i</sub>が障害物<sub>21</sub>に触れ、それを報告した場合は、その場所に対して確率的に障害物の存在を環境地図に表現するため、図8のようにガウス規定関数を用いてポテンシャル場を張り、目標地へ向かう力との合力を計算し、移動方向と距離を決定する。一つの障害物<sub>21</sub>からの斥力を計算するために、ガウス規定関数として次式を用いる。

【0025】

【数6】

$$f_i = k_o \cdot \frac{x - a_i}{\|x - a_i\|} \cdot \exp\left(-\frac{(x - a_i)^2}{b^2}\right)$$

【0026】ただし、

f<sub>i</sub> : 障害物<sub>i</sub>から受ける斥力、

x : 親ロボットの位置、

a<sub>i</sub> : ガウス規定関数の中心位置（平均値）

b : ガウス規底関数の標準偏差

10  
k<sub>0</sub> : 障害物に依存して斥力の大きさを決定する係数。ここでa<sub>i</sub>は次のように定める。すなわち子ロボット<sub>3i</sub>が距離r<sub>i</sub>進んで障害物<sub>21</sub>に接触した後、親ロボット<sub>2</sub>のところに戻ってその位置を知らせる時、次式のように、接触位置を通るその子ロボットの進行方向uに、長さb/2加えた位置をa<sub>i</sub>とする。

【0027】

【数7】

$$a_i = \left(r_i + \frac{b}{2}\right) \cdot u + x$$

【0028】ただし、

【0029】

【数8】

$$\|u\| = 1$$

【0030】一方障害物<sub>21</sub>が危険物であったため子ロボットが破損し、戻ってこなかった場合には、どの程度離れた所に危険な障害物があるのかわからない。そこで図9のように、子ロボットが進んだ方向で、直前にセンシングして障害物が存在しないことがわかっている範囲の境界上にガウス基底関数を置く。その位置a<sub>i</sub>は図1

(5)

8  
0のようにその進行方向に対して  
【0031】

【数9】

$$a_i = r \cdot (1 - \alpha) \cdot u + x$$

【0032】とする。ただし $\alpha$ はロボット群<sub>1</sub>の進行距離に対する安全率である。最終的なロボットの進行方向を決めるには、目標値までの勾配と各障害物<sub>21</sub>による斥力の合力を用いる。

【0033】

【数10】

$$F = f_g - \sum_{i=1}^m f_i$$

【0034】ただし、

F : ロボット群が進行する方向と強さ

m : 認識された障害物の数

である。ここで得られた合力ベクトルは進行方向と移動させるべき距離の度合を示している。移動距離は次のようにして決定する。まず子ロボットのセンシング距離r<sub>i</sub>に対し、それに安全率 $\alpha$ をかけた上で、j回に分け、次の式で合力Fより移動方向と距離を計算しながら移動する。各回の移動ステップv<sub>i</sub>は、

【0035】

【数11】

$$v_i = \frac{\alpha \cdot r}{j} \cdot \frac{F}{\|F\|} \cdot \frac{\|F\|}{\|f_g\|}$$

【0036】

【数12】

$$v_i = \frac{\alpha \cdot r}{j} \cdot \frac{F}{\|f_g\|}$$

【0037】とする。数式9の右辺第3項は、目標値に対して斥力が大きくなるほど進行する距離を短くする効果があり、注意深く進むようにできる。これらを用いて1回の協調センシングによってロボット群が進む経路は  
【0038】

【数13】

$$v = \sum_{i=1}^j v_i$$

【0039】と計算できる。

(実験例) 以上、提案したロボット群システムによって、危険な障害物が存在する環境を移動できることをシミュレーションによって示す。

(シミュレーション条件) 障害物には2つの種類がある。1つは岩や壁などのようにロボットの進行を妨げるものである。この障害物には子ロボットが接触しても壊れることはない。もう一つは穴や地雷、ぬかるみなどのようにロボットが接触するあるいはその領域にはいるこ

(6)

9

とによって、移動することができなくなったり、破壊されてしまうような障害物である。これらの障害物を環境の中に設定する。ロボット群はこれらの環境情報を知らないが、親ロボットは現在位置と目標位置を人間から与えられているとする。複数の子ロボットによる協調センシングによって、親ロボットは環境を認識し、ポテンシャル場によって障害物を表現する環境地図を前に述べた方法によって獲得する。簡単のため、ロボット群は平面上で移動し、子ロボットは同一距離動くものとする。また環境の中の障害物は円を重ね合せて表現する。図11 (a) に障害物が存在する環境を示す。親ロボット1台に対して初めの子ロボットを  $n = 11$  台とした。子ロボットによるセンシング範囲の進行方向に対する広がり  $\theta$  を  $\pi/3$  ラジアンとした。したがって  $2\theta = 2\pi/3$  の範囲を子ロボットの台数  $n - 1$  で割った角度で振り分ける。

#### (シミュレーション結果)

(危険な障害物が存在しない環境での協調センシングによる移動) まず、図11 (a) のように子ロボットを破壊するような危険な障害物が存在しない場合について、協調センシングによって環境を認識し、ロボット群を移動させた。まず子ロボットが協調して環境をセンシングし、その情報を親ロボットに報告する。親ロボットは、子ロボットからの環境情報を基に、環境地図としてガウス規定関数を用いたポテンシャル場を作成し、前に示した方法によって経路を決め移動する。図11 (b)、

(c) に検知した障害物の境界上にガウス規定関数のポテンシャル場を設定しながら親ロボットが移動していく様子を示す。図に示すように障害物を回避しながら親ロボットは目標点に到達することが確認される。このとき、環境認識のための協調センシングは12回行うことと、×印で示される目標地点に到達することができた。この危険な障害物が存在しない場合の子ロボットは、障害物が立体的で、超音波や光を反射する物質であれば、超音波などの非接触センサを複数用いることと等価であり、この場合は提案するアルゴリズムは、単体ロボットのための障害物回避問題に対する一解法を与えることになる。

(危険な障害物が存在する環境での協調センシングによる移動) ここでは、図12のように危険な障害物（濃い模様A、B、Cで表示）を含む環境で、移動を行った。子ロボットによって協調センシングを行い、ガウス規定関数を用いたポテンシャル場によって親ロボットが環境地図を作成し、経路計画と移動を行わせた。ここで移動の途中で子ロボットが危険な障害物に接触した場合にはそれが故障したとして、親ロボットの元に戻らないようにした。一定時間待って子ロボットが戻らなければ、親ロボットは危険環境を認識し、前に述べたアルゴリズムで、その領域を避けた経路を計画するようなポテンシャル場を設定した。図13にセンシングと軌道生成の様子

10

を示す。図13 (a) では親ロボットが進行し、4回目のセンシングで、複数の子ロボットが危険物Aに接触して故障した状態を示す。図13 (b) は子ロボットが戻らないことで、危険物A前方に帰還しない子ロボットに応じてガウス規定関数を用いたポテンシャル場を環境地図上に構成した状況を示す。また、図13 (c) は子ロボットの配置を再構成し、センシング領域の自己修復を行った様子を示す。こうした行動を繰り返しつつ、結果的に19回目のセンシングで親ロボットは目標点に達することができた（図13 (d)）。この例では危険な障害物に接触して故障した子ロボットが発生するため、システムの自己修復機能で子ロボットのセンシングの間隔が広がり、かつ数式1に基づき安全に移動すべくセンシング距離が縮められるので、結果として目標地点に到達するまでの協調センシングの回数は危険物の無い前述の場合に比べて当然増加している。

#### 【0040】

【発明の効果】この発明の自律型移動ロボット群システムの制御方法によれば、複数の子ロボットを親ロボットが管理するのでシステムの最適化が比較的容易であり、また子ロボットも自律機能を有するので、親ロボットの経路計画時の計算の負荷を低減させることができ、親ロボットの管理機能によってロボット群の協調動作による無駄時間の発生を少なくしてシステムの効率を上げることができる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】親子ロボットによるロボット群を示す説明図。

【図2】親子ロボットの構成を示すブロック図。

【図3】親子ロボットによる協調センシングの状態を示す説明図。

【図4】子ロボットによる接触センシングの状態を示す説明図。

【図5】子ロボットによる危険な障害物の接触センシングの状態を示す説明図。

【図6】子ロボット群による自己修復機能（耐故障性）を示す説明図。

【図7】親子ロボットの動作を示す流れ図。

【図8】親ロボットの環境認識と環境地図上の表現の状態を示す説明図。

【図9】親ロボットによる危険な環境の認識と環境地図上の表現の状態を示す説明図。

【図10】環境地図内での危険な障害物の表記法を示す説明図。

【図11】危険な障害物が存在しない環境での協調センシングによる移動のシミュレーション結果を示す説明図。

【図12】危険な障害物が存在する環境を示す説明図。

【図13】危険な障害物の認識と故障に対する自己修復機能によってセンシングを継続する様子を示す説明図。

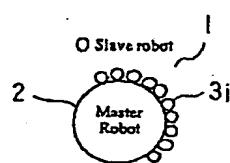
【符号の説明】

(7)

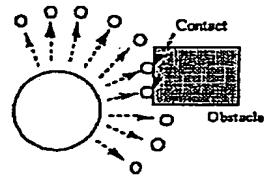
11

- 1 ロボット群
- 2 親ロボット
- 3 子ロボット
- 4 計算装置
- 5 通信装置
- 6 移動装置
- 7 非接触センサ
- 8 移動距離測定装置

【図 1】

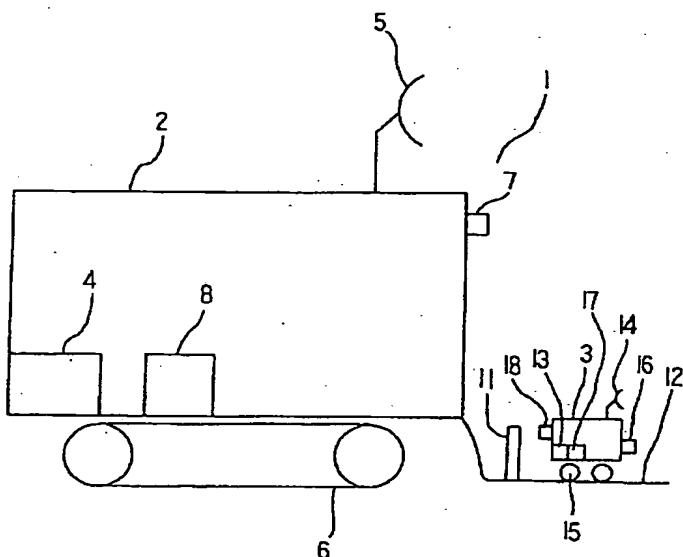


【図 4】

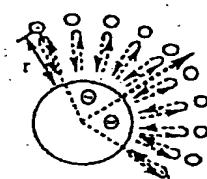


- 1 1 エネルギー供給装置
- 1 2 スカート
- 1 3 計算装置
- 1 4 通信装置
- 1 5 移動装置
- 1 6 接触センサ
- 1 7 移動距離測定装置
- 1 8 エネルギー受入装置

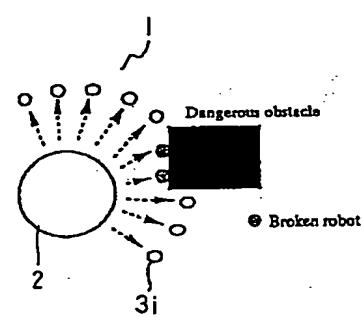
【図 2】



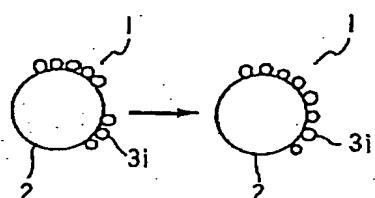
【図 3】



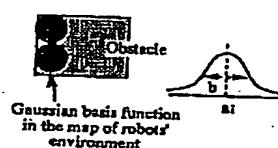
【図 5】



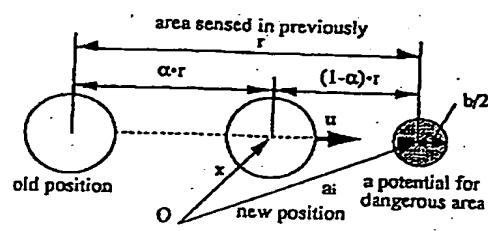
【図 6】



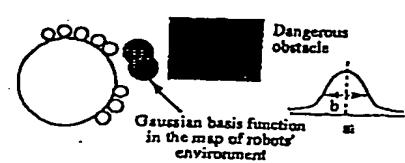
【図 8】



【図 10】

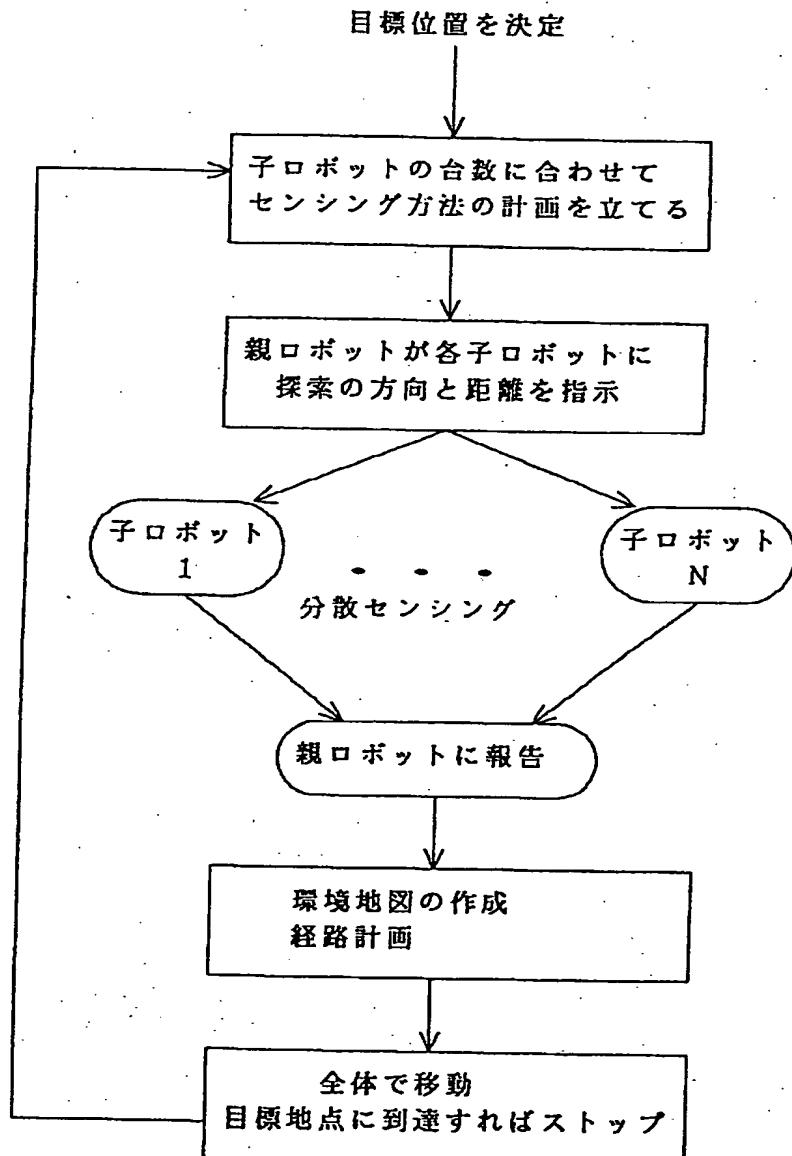


【図 9】



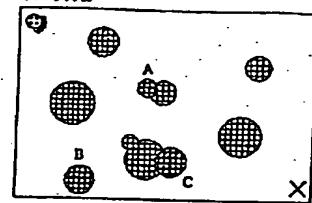
(8)

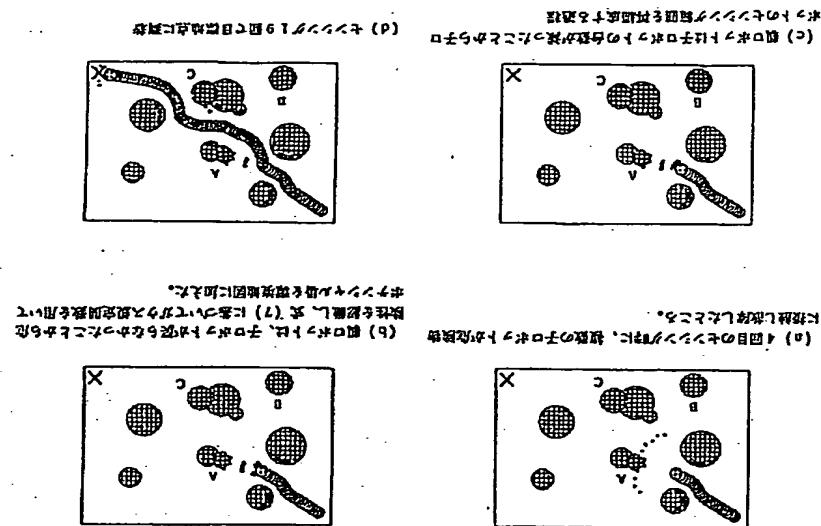
【図7】

親子ロボット移動のフローチャート

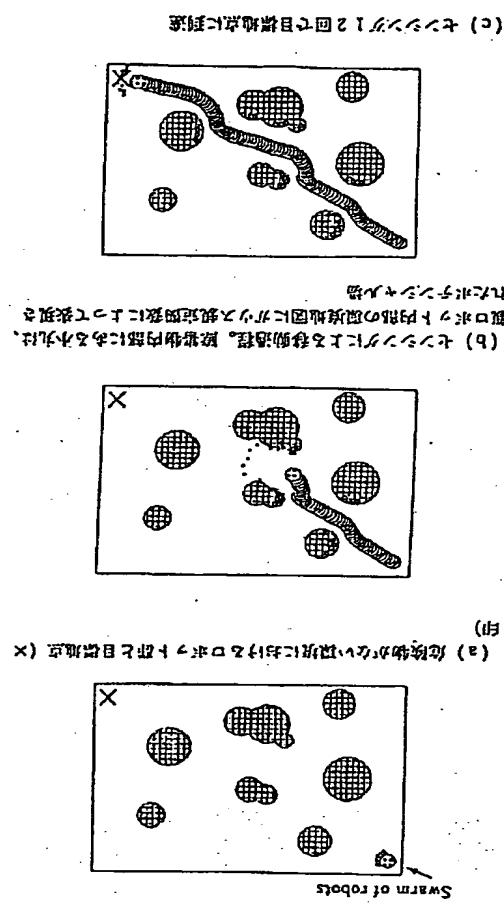
【図12】

Swarm of robots





【図1-3】



【図1-1】

(6)